

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №4, Том 8 / 2021, N 4, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-4-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS421.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS421 (<https://doi.org/10.15862/13SATS421>)

Оценка прочности дорожных покрытий с внутренними трещинами

Каменчуков А.В., Украинский И.С., Селенок М.Д.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Каменчуков Алексей Викторович, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Аннотация. Статья является завершённым этапом исследования прочности многослойных дорожных одежд с внутренними трещинами. В работе проверена адекватность гипотезы о влиянии внутренних трещин на прочность покрытия. Авторами выполнен обзор и анализ методик стендовых испытаний дорожных покрытий. Разработана программа испытаний образцов двухслойного покрытия из асфальтобетона при наличии и отсутствии имитационной трещины в нижнем слое покрытия. Образцы-цилиндры покрытия изготовлены в лаборатории и испытаны на одноосное сжатие и сдвиг, и образцов-белочек на растяжение при изгибе, при различных температурных условиях, имитирующих условия эксплуатации покрытия на автомобильных дорогах. Результаты испытаний, в целом, подтверждают адекватность выдвинутой гипотезы и не противоречат общепринятой теории прочности асфальтобетона. Также выполнена работа по математическому моделированию и

оценке напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной одежды с внутренними трещинами в нижнем слое покрытия. Математическая модель показала значительные изменения в напряженно-деформированном состоянии образцов с внутренними трещинами, что коррелируется с результатами лабораторных испытаний. На основе полученных результатов разработана, и проверена в лаборатории и математически, модель образца усиленного геосинтетическими материалами. Образец с трещинной усиленной георешеткой показал более высокие параметры прочности на растяжение при изгибе. В заключении даны рекомендации по повышению трещиностойкости дорожного покрытия на стадии ремонтных работ.

Ключевые слова: дорожная одежда; диагностика; стендовые испытания; лабораторные испытания; прочность; сдвиг; трещиностойкость

Уведомление об исправлении

В данной статье имеется правомерное заимствование из статьи:

Александров, А.С. Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления / А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л. Калинин. — DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745> // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». — 2019. — Т 16. — № 6. — С. 718–745. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/986>

Однако, в результате ошибки, ссылка на данную статью имела ошибочное расположение в тексте. 14.07.2023 статья была скорректирована, для исправления этого недочета.

Tenability evaluation of road pavement with internal cracks

Aleksey V. Kamenchukov, Ilya S. Ukrainskiy, Marina D. Selenok

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Kamenchukov, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

Abstract. The article is a completed stage in the study of the multilayer road pavement with internal cracks tenability. The work tested the hypothesis adequacy about internal cracks' effect on the pavement strength. The authors reviewed and analyzed the bench testing methods of road pavement. A program has been developed for testing two-layer asphalt concrete pavement samples in the presence and absence of an imitation crack in the lower pavement layer. Pavement test cylinders were made in the laboratory and tested for uniaxial compression and shear, and test beam for tension in bending, under various temperature conditions, simulating the operating pavement conditions on highways. In general, the test results confirm the proposed hypothesis adequacy and do not contradict the generally accepted asphalt concrete

strength theory. Also, were executed mathematical modeling and stress-strain state evaluation of multilayer road pavement with internal cracks in the lower pavement layer. The mathematical model showed significant changes in the stress-strain state of samples with internal cracks, which correlates with the laboratory tests results. Based on the obtained results, a sample model reinforced with geosynthetic materials was developed and tested in the laboratory and mathematically. The fractured geogrid-reinforced sample showed higher tensile strength parameters in bending. In conclusion, recommendations are given to improve the crack resistance at the stage of repair work.

Keywords: pavement; diagnostics; bench tests; laboratory tests; strength; shear; crack resistance

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Исторически сложилось так, что сеть автомобильных дорог страны развивалась неравномерно, в европейской части страны плотность дорог значительно больше, чем в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Инженерно-геологические и природно-климатические условия работы дорожных конструкций так же нельзя назвать однородными на территории Российской Федерации. Более 70 % территории страны относятся к районам рискованного земледелия, с преобладанием многолетнемерзлых грунтов и относятся к сложным инженерным условиям проектирования, строительства и эксплуатации объектов капитального строительства [1–3].

Территория Дальнего Востока страны, по характеру взаимодействия инженерных объектов с геосредой, несомненно, относится к территориям со сложными инженерно-геологическими и грунтово-гидрологическими условиями. Различные сочетания инженерно-геологических, природно-климатических и техногенных факторов оказывают неблагоприятное комплексное воздействие на дорожную конструкцию: изменённые, водно-теплогового режима, развитие развития и накопление необратимых деформаций земляного полотна и слоев дорожной одежды, в том числе пластических деформаций в зонах торможения и разгона транспортных средств, износ (истирание) покрытия [4–8].

Диагностика дорожных покрытий

Road pavement diagnostics

Технического состояния дорог оценивают по «Рекомендациям по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог» ОДМ 218.4.039-2018. Наиболее характерными дефектами, приводящими к ухудшению качества дорожного покрытия, является износ (истирание) покрытия, колееобразование, выбоины и трещины, которые под действием воды и транспортной нагрузки развиваются в выбоины [9–12].

Методика диагностики, описанная в ОДМ 218.4.039-2018 позволяет производить диагностические работы на автомобильных дорогах федерального, регионального и местного значения, с целью получения полной, объективной и достоверной информации о транспортно-эксплуатационном состоянии дорог. Что в дальнейшем даст возможность обновить банк дорожных данных о техническом уровне и эксплуатационном состоянии, а также определить участки дорог, на которых требуется проведение ремонтных работ [13; 14].

В настоящее время при диагностике автомобильных дорог оцениваются следующие показатели:

- Продольная ровность. Расчет показателя IRI производился по участкам равным протяжённости 100 м и 1000 м и только на автомобильных дорогах, имеющих облегченный либо капитальный тип дорожной одежды, а именно покрытие, укрепленное асфальтобетоном, гравиям обработанным органическим вяжущем и т. п. Единицей измерения является (м/км). Оценка технического состояния по продольной ровности производится путем сравнения фактических значений с нормативными. Нормативные показатели задаются в зависимости от категории дороги и типа дорожной одежды.

- Регистрация повреждений дорожного покрытия осуществлялась с помощью визуального осмотра и анализа видео файлов. После определения повреждений на дороге, задавался соответствующий дефекту балл, согласно нормативным показателям. Участок автомобильной дороги, на котором зафиксировано наличие дефектов с оценкой менее 4,0 баллов, считается находящимся в ненормативном состоянии.

- Оценка поперечной ровности (колеи) осуществляется с помощью расчета данных, полученных с дорожной лаборатории. Оценка технического состояния по поперечной ровности (колеи) производится путем сравнения фактических значений с нормативными. Нормативные показатели задаются в зависимости от категории и типа дорожной одежды. Измерения производятся только на облегченном и капитальном типе покрытия.

Для устранения дефектов покрытия в процессе эксплуатации чаще всего применяют-таки технологии как: заделка трещин битумной мастикой и эмульсиями (в весенний период); поверхностная обработка покрытия и технология Слари Сил; фрезерование и разборка верхнего слоя покрытия с устройством нового покрытия; струйно-инъекционная заделка трещин и выбоин; термопрофилирование и ресайклинг дорожного покрытия.

Непосредственно перед выполнением работ по ремонту покрытия выполняют диагностическое обследование дорог, для установления фактического уровня износа покрытия. Для оценки ровности покрытия по методике IRI, как правило, используют метод лазерного сканирования, с последующей дешифровкой и систематизацией информации в камеральных условиях. Кроме этого, для корреляции результатов сканирования величину колеи и ровность покрытия, на отдельных участках, измеряют дорожной трехметровой рейкой [14].

Стендовые испытания дорожных одежд [10]

Road pavement bench tests

В целях рационального конструирования деформационно-устойчивых дорожных одежд представляют интерес данные натурных испытаний, позволяющие определить причины формирования износа, колеи и трещин в конструкциях из различных материалов и разной капитальности.



a — имитатор университета Кентербери (Новая Зеландия, южный остров); б — имитатор Нантского университета (Франция); в — имитатор Андского университета (Колумбия)

a — Canterbury University simulator (New Zealand, South Island); b — Nantes University simulator (France); c — Andes University simulator (Colombia)

Рисунок 1. Кольцевые стенды испытания дорожных одежд [14–18]

Figure 1. Circular test bench for pavement testing [14–18]

Такие данные получены в рамках международной программы полномасштабных ускоренных испытаний покрытий (Full-scale Accelerated Pavement Testing «f-sAPT»), при реализации которой выполнены испытания дорожных конструкций в Австралии, Бразилии, Германии, Голландии, Китае, США (штаты Вирджиния, Дакота, Индиана, Калифорния, Канзас, Луизиана, Миннесота, Флорида и др.), Швеции, ЮАР, Японии. Безусловно, что такие экспериментальные данные уникальны и могут быть использованы во многих странах мира. Испытания проводятся при помощи кольцевых стендов, применяемых для специально построенных конструкций, или имитаторов колесной нагрузки, которые используют для испытаний дорожных одежд, как на опытных полигонах, так и конструкций на эксплуатируемых дорогах.



a — Caltrans/UCPRC HVS; б — FloridaDOT; в — TxDOT MLS (обновленный вариант); г — Kansas APT; д — Indiana DOT APTF; e — Louisiana DOTD ALF

(a) Caltrans/UCPRC HVS; b — FloridaDOT; c — TxDOT MLS (updated version); d — Kansas APT; e — Indiana DOT APTF; f — Louisiana DOTD ALF

Рисунок 2. Имитаторы подвижной нагрузки [19–22]

Figure 2. Rolling load simulators [19–22]

Кольцевые стенды (рис. 1) применяют на опытных полигонах, на которых предварительно устраивают испытываемую конструкцию дорожной одежды. При строительстве дорожной одежды в нее устанавливают датчики, позволяющие измерять деформации [15–18]. Согласно требованиям ОДМ 218.2.091-2017 такие измерения называют тензометрическими наблюдениями, применяемыми для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций. Достоинством этих испытаний является возможность расположения датчиков по глубине как на границах раздела слоев, так и внутри слоя. При обработке данных можно судить о вкладе того или иного слоя дорожной одежды, а также грунта земляного полотна в смещение поверхности покрытия, накопленное в результате воздействия нагрузки.

На рисунке 2 приведены линейные имитаторы подвижной нагрузки [19–22], достоинством которых является возможность их транспортировки. Поэтому такие имитаторы применяют как для испытаний конструкций, построенных на опытных полигонах, так и дорожных одежд на эксплуатируемых участках дорог.

Анализ результатов данных испытаний позволяет определить условия, при которых определенный элемент дорожной конструкции вносит наибольший вклад в накопленную всей системой «дорожная одежда — земляное полотно» остаточную деформацию или глубину колеи на покрытии. Также имеется возможность исследования условий, при которых деформации материала конструктивного слоя являются деформацией сдвига.

Лабораторные испытания дорожного покрытия (образцов) на сжатие и сдвиг

Road pavement (samples) laboratory testing for soot and shear

Согласно общепринятым представлениям о напряженно-деформированном состоянии асфальтобетонного покрытия дорожной одежды величина растягивающих напряжений в нем незначительна и наличие трещин в нижних слоях покрытия, заполненных в процессе ремонта однородным материалом, обеспечивает необходимые прочностные связи в структуре покрытия и не приводит к ощутимому снижению его прочности. Однако, опыт эксплуатаций подобных конструкций говорит об обратном — над трещинами в нижних слоях развиваются отраженные трещины вышележащего слоя.

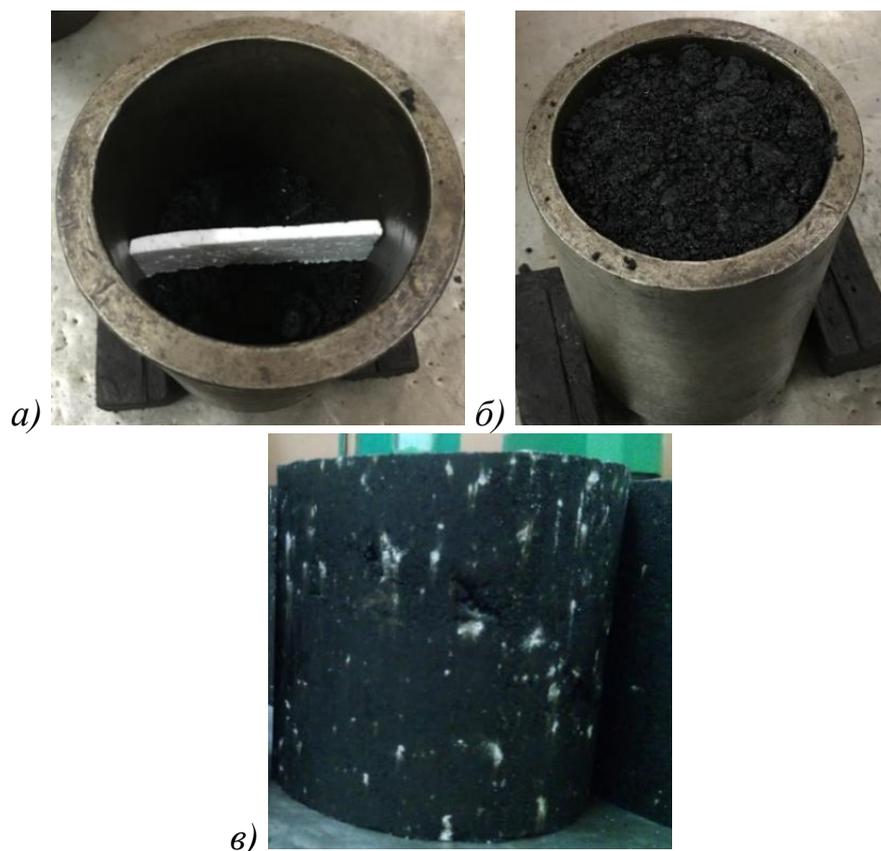
Образование отраженных трещин на покрытиях дорожных одежд — сложный многостадийный процесс, происходящий с участием большого количества переменных, независимых факторов. Моделирование процесса

развития отраженных трещин в дорожном покрытии с учетом влияния всех этих факторов на лабораторных образцах — это сложная, нетривиальная научная задача. Предлагаемая авторами методика проходит этап апробации, накопления экспериментальных данных.

Первым этапом разработки лабораторной модели в описываемом исследовании стало исследование влияния наличия трещин в нижнем слое покрытия на прочность конструкции на сжатие. Для проверки выдвинутых гипотез в испытательном центре строительных материалов Тихоокеанского государственного университета выполнено испытание образцов двухслойного покрытия из асфальтобетона с заложением в нижний слой покрытия искусственной трещины.

Для изготовления образцов использовалась асфальтобетонная смесь, наиболее широко применяемая в регионе исследования для сооружения покрытий дорожных одежд: мелкозернистая асфальтобетонная смесь, тип Б марка I на битуме с границами пенетрации 90–130. Смесь была изготовлена на асфальтобетонном заводе, повторно разогрета в лаборатории и отформована. Формование смеси происходило в температурном диапазоне 140–150°C путем прессования в стальных цилиндрических формах под нагрузкой в 40 МПа.

Согласно плану эксперимента было изготовлено 4 серии образцов, по 6 образцов в каждой серии: три серии образцов с трещиной, и одна контрольная серия без трещины. Образцы цилиндрической формы высотой и диаметром 10 см. При формовании смесь укладывалась двумя слоями толщиной слоя после уплотнения 6 см и 4 см. Для моделирования в структуре материала трещины, заполненной полимерным веществом без прочностного каркаса из минерального заполнителя, в нижний слой образца закладывалась пластина из экструдированного пенополистирола. Выбранный материал имел достаточную жесткость и температурную стойкость (температура плавления экструдированного пенополистирола +270°C, температура укладки асфальтобетона — в интервале 140–150°C) для моделирования трещин в заданном направлении и с требуемой глубиной 2 см, 3 см и 4 см (рис. 3). В то же время прочностные свойства экструдированного пенополистирола не позволяли создать армирующий элемент, придающий асфальтобетонному образцу дополнительную жесткость. Пористая структура экструдированного пенополистирола, уплотняющаяся в процессе формования образца под нагрузкой в 40 МПа, создавала в структуре асфальтобетона элемент, схожий по своим свойствам с трещиной, заполненной полимерно-битумной мастикой. Образцы формовались в соответствии с ГОСТ 12801-98.



a — закладка трещины; б — образец, заполненный асфальтобетоном; в — двухслойный образец
a — crack filling; b — sample filled with asphalt concrete; c — two-layer sample

Рисунок 3. Моделирование трещины в образце (разработано автором)

Figure 3. Crack simulation in a sample (developed by the author)

После выдерживания необходимого срока для остывания, твердения и набора прочности образцы были испытаны на сжатие на прессе ИП 6083-500-0. Перед испытанием образцы не подвергались дополнительному термостатированию, испытание проводилось при температуре в лаборатории 20°C. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

В ходе обработки результатов испытания была получена линейная эмпирическая зависимость прочности двухслойного элемента из асфальтобетона от геометрических параметров трещины, в виде:

$$y = Ax + b, \quad (1)$$

где x — глубина трещины, мм; A — эмпирический коэффициент, $A = -0,206$; B — эмпирический коэффициент, $B = 5,025$.

Таблица 1 / Table 1

Предел прочности на сжатие, МПа
Ultimate compressive strength, MPa

№ образца Sample No.	Предел прочности образца, МПа, при глубине трещины Sample ultimate stress limit, MPa, at crack depth			
	2 мм	3 мм	4 мм	контрольный (0 мм) control (0 mm)
1	4,65	4,68	4,92	5,39
2	4,24	4,85	4,53	5,54
3	5,43	3,93	3,68	4,23
4	4,27	4,50	3,69	4,92
5	5,51	4,08	3,54	4,57
6	3,97	3,83	5,12	5,47
Среднее Average	4,68	4,31	4,24	5,02
$y = ax + b$	4,61	4,41	4,20	5,03

Разработано автором / Developed by the author

Результаты испытаний подтвердили выдвинутую гипотезу, но для расширения области применения предложенной модели было принято увеличить количество факторов, исследуемых на данной модели.

Следующим этапом разработки модели стало исследование влияния температурных режимов эксплуатации асфальтобетонного покрытия на его прочностные характеристики, при условии, что в нижних слоях покрытия имеются внутренние трещины.

Для проведения испытаний было изготовлено шесть серий по десять образцов цилиндров с диаметром и высотой 7 см. Как и в предыдущем опыте, при формовании смесь укладывалась двумя слоями 3 и 4 см. Элемент, имитирующий трещину, имел высоту 2 см. Образцы, испытанные при 50°C и 0°C подвергали термостатированию в воде, образцы, испытанные при -30°C — в морозильной камере.

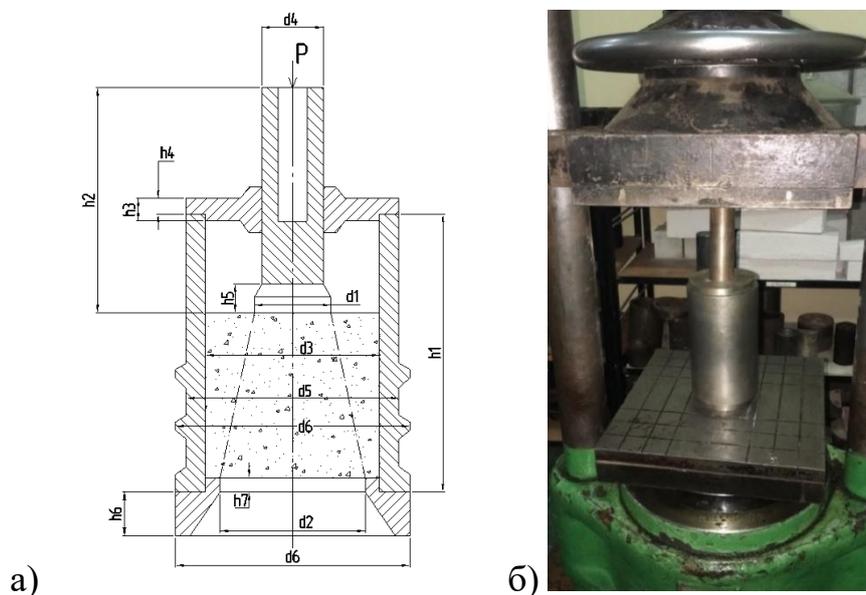
Полученные результаты показали снижение однородности, что в целом не противоречит общепринятой теории прочности асфальтобетона — стабильные прочностные показатели материал имеет в узком диапазоне температур, называемом рабочим диапазоном температур. Часть результатов в ходе статистической обработки не прошло проверки на ошибки и было отброшено при конечной обработке результатов. Полученные результаты подтвердили теоретическую гипотезу — образцы с внутренней трещиной показали более низкую прочность и однородность прочности, чем контрольные образцы. В таблице 2 представлена обработка результатов испытаний, в том числе гарантированное значение прочности, рассчитанное по показателям однородности.

Таблица 2 / Table 2

Исследование влияния температуры
Temperature influence study

№ образца Sample No.	Прочность образцов, МПа, при температуре, °С Sample strength, МПа, at temperature, °С					
	50		0		-30	
	контрольный control	с трещиной with a crack	контрольный control	с трещиной with a crack	контрольный control	с трещиной with a crack
1	0,875	0,6475	8,435	8,2	18,35	16,66
2	0,6875	0,61	8,71	8,2425	19,5525	15,5675
3	0,895	0,845	9,18	7,975	21,1975	19,7525
4	0,81	0,8775	8,7525	7,365	25,3	12,8475
5	0,725	0,97	8,3925	6,4275	21,6925	18,7075
6	0,84	0,8075	7,7175	7,8175	20,59	20,3475
7	0,6475	0,7225	7,3125	6,8275	24,9875	23,44
8	0,875	0,85	7,405	7,7525	21,15	23,835
9	0,8325		8,145	6,9075	23,22	19,3775
10			9,4625	7,93	22,2575	26,275
ср. знач average value	0,798611	0,79125	8,35125	7,5445	21,82975	19,681
ско root-mean-square deviation	0,089827	0,122029	0,717921	0,629672	2,207108	4,070215
коэф. вар. coefficient of variation	0,112479	0,154223	0,085966	0,083461	0,101106	0,206809
гарант. знач. guaranteed value	0,595602	0,509363	6,750287	6,140331	16,9079	10,60442

Разработано автором / Developed by the author



а — схема приспособления; б — проведение испытаний

a — device diagram; b — testing

Рисунок 3. Приспособление для испытания образцов на сдвиг (разработано автором)

Figure 3. Device for testing samples for shear (developed by the author)

Для оценки влияния внутренних трещин на сдвигоустойчивость асфальтобетона были изготовлены четыре серии образцов по 24 штуки в каждой: две на асфальтобетоне типа Б и две на асфальтобетоне типа 5, с дефектом и контрольная серии соответственно (табл. 3). Испытание на сдвиг происходило по методическим рекомендациям, разработанным Объединением «Дорстройпроект» и ФГДUP «Омский Союздорнии». Экспериментальное приспособление показано на рисунке 3.

Таблица 3 / Table 3

Сдвиговые испытания

Shear tests

№ образца Sample No.	Асфальтобетон тип Б Asphalt concrete type B				Асфальтобетон тип 5 Asphalt concrete type 5			
	осевое сжатие axial compression		касательное по Никольскому shearing according to Nikolsky		осевое сжатие axial compression		касательное по Никольскому shearing according to Nikolsky	
	контр. control	трещ. with a crack	контр. control	трещ. with a crack	контр. control	трещ. with a crack	контр. control	трещ. with a crack
1	4,683	4,9475	3,191	4,836	4,33	4,3425	3,341	3,936
2	5,33	5,1075	3,898	3,882	4,353	3,9025	3,755	3,909
3	3,83	4,508	4,118	4,523	4,67	4,245	4,206	3,564
4	3,94	4,41	3,595	3,805	4,52	4,005	3,564	3,295
5	3,945	3,93	4,836	5,665	4,693	4,638	4,391	3,823
6	4,78	3,91	4,327	5,623	4,5	3,933	3,3	3,805
7	4,61	4,348	3,823	3,845	4,72	4,328	4,041	3,209
8	4,6275	4,27	3,736	4,512	4,69	3,908	3,623	3,591
9	4,6375	3,915	4,214	4,782	4,945	4,25	3,482	3,382
10	6,33	3,63	3,714	3,3	4,098	3,998	4,482	3,618
11	5,205	4,353	4,809	3,491	3,808	4,563	4,127	3,918
12	5,92	5,43	4,85	3,309	3,855		3,945	
ср. знач. average value	4,820	4,396	4,093	4,298	4,432	4,108	3,855	3,741
СКО root-mean-square deviation	0,772	0,538	0,535	0,825	0,357	0,383	0,402	0,425
коэф. вар. coefficient of variation	0,160	0,122	0,130	0,192	0,081	0,093	0,104	0,114
гарант. знач. guaranteed value	3,122	3,213	2,915	2,482	3,647	3,266	2,969	2,805

Разработано автором / Developed by the author

Результаты испытаний также подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что внутренние трещины в многослойном дорожном покрытии приводят к уменьшению прочностей характеристик покрытия и способствует развитию отраженных трещин.

Оценка прочности покрытия на растяжение при изгибе

Pavement strength evaluation on tension in bending

Для оценки уровня износа дорожного покрытия, его прочностных характеристик из покрытия выпиливаются керны диаметром 150 (200) мм или плиты 300x300 мм, для дальнейшего испытания в лабораторных условиях. Испытания на стойкости на колееобразование проводят в специальной установке (например: Оборудование для испытания на колееобразование («Колесо») (рис. 4) в соответствии с ГОСТ Р 58406.3-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса».



*Рисунок 4. Испытание покрытия
на колееобразование в установке (разработано автором)*

Figure 4. Pavement test for wheel tracking in the unit (developed by the author)

Основным показателем прочности дорожного покрытия является предела прочности на растяжение при изгибе, который определяется в соответствии с ГОСТ Р 58406.6-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения».

В настоящем исследовании выполнен сравнительный анализ изменения предела прочности на растяжение при изгибе в образцах с внутренними трещинами и в образцах без трещин.

При выполнении работ использовалось следующее оборудование:

- Машина для испытаний ПМ-1А-70АБ (Свидетельство о поверке № С-АЮ/23-09-2021/96846173 от 23.09.2021 до 24.09.2022).
- Весы Vibra AJ-6200CE (Свидетельство о поверке № С-АЮ/18-02-2021/38915942 от 18.02.2021 до 17.02.2022).
- Шкаф сушильный УТ-4686 (Протокол № 10853 от 26.02.2021 до 25.02.2022).

- Формы цилиндрические ЛО-257 диаметром 71,4 мм (Протокол № ИЛ-741 от 02.11.2021 до 01.11.2022).
- Роллерный компактор, модель В039 (Аттестат № 206223 от 25.11.2020 до 24.11.2021).
- Штангенциркуль ШЦ-I-150 0,1 (Свидетельство о поверке № С-АЮ/09-08-2021/85510126 от 09.08.2021 до 08.02.2022).
- Приспособление для испытания на изгиб (Аттестат № ИЛ-330 от 20.10.2020 до 19.10.2022).

Образцы-плиты приготовлены в соответствии с ГОСТ Р 58406.4-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов-плит вальцовым уплотнителем» из горячего плотного мелкозернистого асфальтобетона тип Б, марки I на БНД 100/130 по ГОСТ 9128-2013.

Перед приготовлением плит, была определена средняя плотность асфальтобетона по ГОСТ 12801-98. Средняя плотность асфальтобетона составила 2,37 г/см³.

На роллерном компакторе изготовлено 4 плиты из асфальтобетона плотностью 2,37 г/см³ размером 30,5×40,0×7,0 см. В 2 плитах на глубине 3,0±0,2 см от верха плиты заложены детали из экструдированного пенополистирола высотой 2,0 см и толщиной 1,0 см имитирующие трещину.

Через 24 часа после изготовления образцов-плит были выпилены 12 образцов-балочек размером 7,0×7,0×30,5 см. Шесть балочек без трещины (рис. 5а) и шесть балочек с имитацией трещины (рис. 5б). Допуск по размерам поперечного сечения ±2,0 мм.

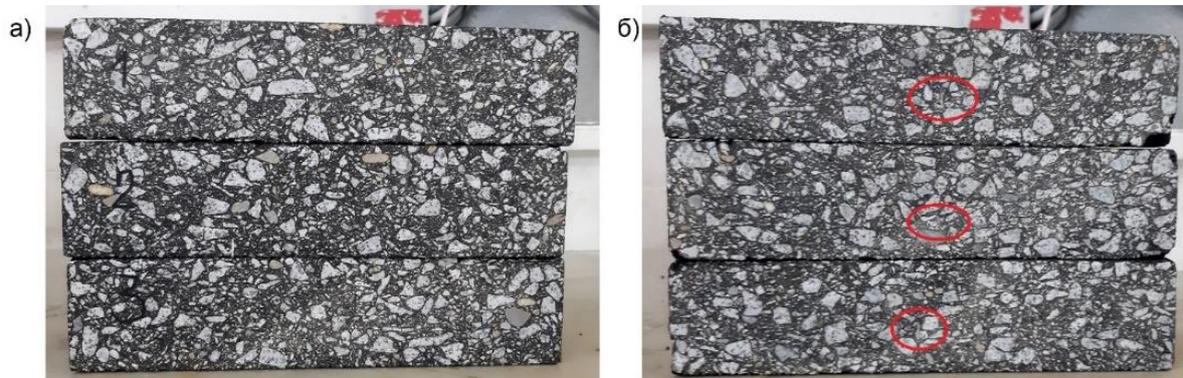


Рисунок 5. Образцы-балочки без трещины (а) и с имитацией трещины (б) (разработано автором)

Figure 5. Test beams without a crack (a) and with a simulated crack (b) (developed by the author)

Образцы-балочки были разделены на две группы, в каждую из которых вошли три балочки без трещины и три балочки с внутренней трещиной, для проведения на изгиб. Первая группа образцов испытывалась при температуре (плюс $22\pm 3^\circ\text{C}$), не регламентированные испытания. Вторая группа образцов перед испытанием была выдержана 24 ч в морозильной камере при температуре (минус $18\pm 2^\circ\text{C}$), в соответствии с п. 8.4.1 ГОСТ Р 58406.6-2020. Расчетная схема испытания, на примере образца-балочки с внутренней трещиной, представлена на рисунке 6.

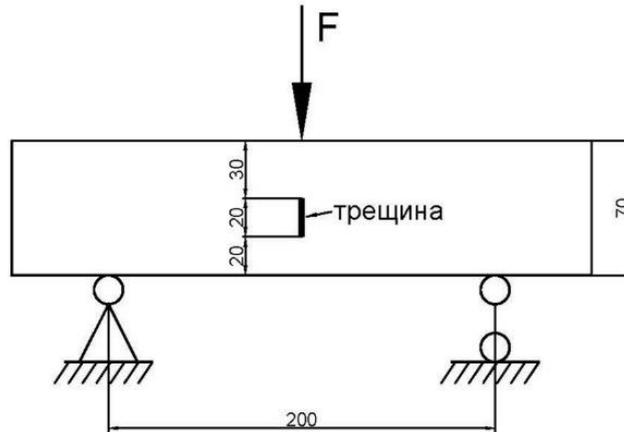


Рисунок 6. Схема испытания образцов-балочек (разработано автором)

Figure 6. Testing scheme for test beams (developed by the author)

Процесс испытания образ-балочек показан рисунке 7, а характер разрушений образцов с без трещин и с трещинами показан на рисунке 8. При температуре образцов (минус $18\pm 2^\circ\text{C}$) происходит образование трещины и разлом балочки в месте приложения нагрузки на две части, а при температуре (плюс $22\pm 2^\circ\text{C}$) образцы испытывают ярко выраженные пластические деформации и также разрушаются разломом в месте приложения нагрузки на две части.



Рисунок 7. Проведение испытаний на изгиб при температуре (минус $18\pm 2^\circ\text{C}$) (разработано автором)

Figure 7. Testing for bending at a temperature of (minus $18\pm 2^\circ\text{C}$) (developed by the author)

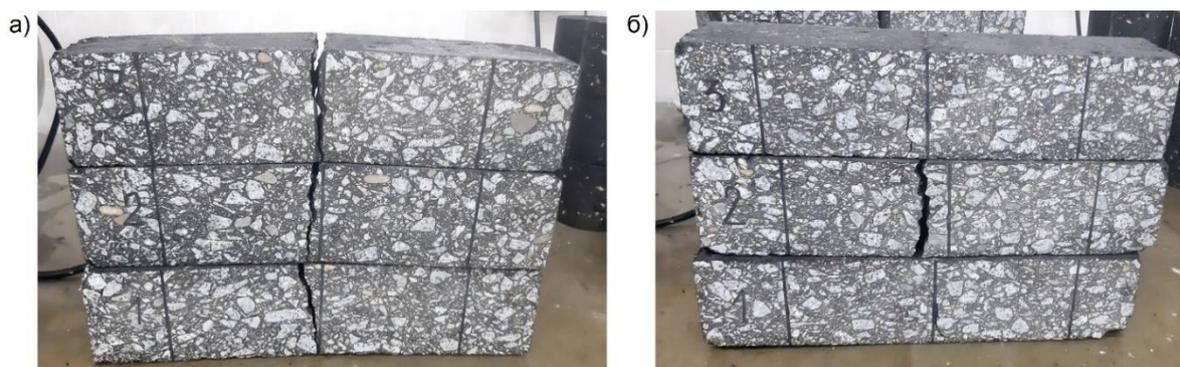


Рисунок 8. Характер разрушения образцов без трещины (а) и образцов с имитацией трещины (б) (разработано автором)

Figure 8. Destruction nature of the samples without cracks (a) and samples with simulated cracks (b) (developed by the author)

Расчет прочности при изгибе на растяжение выполнен по формуле (1) ГОСТ Р 58406.6-2020:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3PL}{2bh^2} 10^{-2}, \quad (2)$$

где Р — разрушающая нагрузка, Н; L — расстояние между опорами, см; b — ширина образца, см; h — высота образца, см.

Результаты испытаний приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 / Table 4

Результаты испытания образцов-балочек при температуре (плюс 22±3°C)

Test beam testing results at a temperature of (plus 22±3°C)

№	Размеры образца-балочки, см Test beam dimensions, cm			Расстояние между опорами L, см Distance between supports L, cm	Максимальное значение прогиба, мм Maximum bending value, mm	Разрушающая нагрузка, Н Load at failure, N	Прочность при изгибе на растяжение, МПа Bending resistance on the strain, МPa	
	ширина b width b	высота h height h	длина l length l				отдельного образца individual sample	среднее значение average
Образцы-балочки 1 группа Test beam group 1								
1	7,20	7,15	30,5	20,0	2,30	2824	2,30	2,21
2	7,20	7,15	30,5	20,0	2,17	2700	2,20	
3	7,20	7,15	30,5	20,0	2,10	2616	2,13	
Образцы-балочки 2 группа с имитацией трещины Test beam group group 2 with simulated crack								
1	7,15	7,20	30,5	20,0	2,27	1551	1,26	1,26
2	7,15	7,15	30,5	20,0	2,22	1541	1,26	
3	7,20	7,15	30,5	20,0	2,30	1544	1,26	

Разработано автором / Developed by the author

Таблица 5
Результаты испытания образцов-балочек при температуре (минус 18±2°С)

№	Размеры образца-балочки, см Test beam dimensions, cm			Расстояние между опорами L, см Distance between supports L, cm	Максимальное значение прогиба, мм Maximum bending value, mm	Разрушающая нагрузка, Н Load at failure, N	Прочность при изгибе на растяжение, МПа Bending resistance on the strain, MPa	
	ширина b width b	высота h height h	длина l length l				отдельного образца individual sample	среднее значение average
Образцы-балочки 1 группа Test beam group 1								
1	6,85	7,00	30,5	20,0	0,97	9033	8,07	9,24
2	7,00	7,00	30,5	20,0	0,71	11212	9,81	
3	7,00	7,05	30,5	20,0	1,16	11404	9,83	
Образцы-балочки 2 группа с имитацией трещины Test beam group group 2 with simulated crack								
1	6,95	7,00	30,5	20,0	0,76	8577	7,56	8,25
2	7,15	7,00	30,5	20,0	1,08	10136	8,68	
3	7,00	7,00	30,5	20,0	0,66	9721	8,50	

Разработано автором / Developed by the author

Анализ результатов, представленных в таблицах 4 и 5 показал, что прочность на растяжение при изгибе образцов с трещиной примерно в 2 раза меньше, чем у образцов без трещины при температуре плюс 22±3°С (соответствует весенне-осеннему периоду эксплуатации покрытия) и на 10 % меньше при температуре минус 18±2°С (соответствует зимнему периоду эксплуатации покрытия).

Оценка напряженно-деформированного состояния

Stress-strain state evaluation

Все виды натуральных и лабораторных испытаний дорожных одежд на прочность, износостойкость, сопротивление колееобразованию и трещиностойкость гарантируют адекватность работы модели с высоким уровнем доверительной вероятности при проведении экспериментов в идентичных или близких по своим свойствам условиям эксплуатации материала. Так как территория Восточной Сибири и Дальнего Востока России существенно отличается, по природно-климатическим и инженерно-геологическим условиям эксплуатации строительных объектов, от Центральной и Европейской части страны, то возникает необходимость апробировать, корректировать и оптимизировать большинство технологий к местным условиям эксплуатации.

Удаленные регионы страны всегда испытывали сложности в финансировании, именно поэтому проведение полномасштабных натуральных испытаний не всегда целесообразно с экономической точки зрения.

В строительной отрасли для оценки прочностных характеристик строительных материалов и изделий, в последнее десятилетие, стали широко применяться методы математического моделирования. Для математического моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия применяются программные комплексы ЛИРА, Geo5, GenIDE32 [23; 24].

Для исследования процессов образования и развития внутренних (отраженных) трещин в покрытии дорожных одежд выполнены работы по оценке напряженно-деформированного состояния двухслойных асфальтобетонных систем:

- верхний слой из асфальтобетона $E = 2400$ МПа (толщина 3 см);
- нижний слой из асфальтобетона $E = 1400$ МПа (толщина 4 см);
- трещина, заполненная битумной мастикой $E = 0,5$ МПа (толщина 2 см ширина 1 см).

Решение статических задач линейной теории упругости производится на основе численного решения уравнений линейной теории упругости методом конечных элементов (МКЭ) [25–27].

Уравнения равновесия для однородного, изотропного и весомого тела выглядит следующим образом:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_{ij,j}$ — частные производные тензора напряжений; F_i — объемные силы в системе координат $i, j = x, y, z$.

Относительные деформации считаются малыми и компоненты тензора относительных деформаций определяются по уравнениям Коши — геометрические уравнения:

$$\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{ij} + u_{ji}), \quad (4)$$

где $u_{i,j}, u_{j,i}$ — частные производные компонент вектора перемещений в принятой системе координат.

Условия связи между компонентами тензора напряжений и тензора относительных деформаций (уравнения физического состояния) имеют следующий вид:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где E_{ijkl} — компоненты симметричного тензора упругости, а именно:

$$E_{ijkl} = E_{jikl} = E_{jilk} = E_{ijlk}. \quad (6)$$

Уравнения неразрывности деформаций (уравнения Навье)

$$E_{ijkl}u_{j,kk} + E_{jikl}u_{j,ki} + F_i = 0. \quad (7)$$

Граничные условия записываются в виде:

$$u_i = u_i n_i \text{ на } S_{ij}; \quad (8)$$

$$F_i = \sigma_{ij} n_j \text{ на } S_f, \quad (9)$$

где n_i, n_j — направляющие косинусы на границах S_u и S_f ; u_i, F_i — векторы перемещений и усилий на тех же границах соответственно.

Принцип возможных перемещений (Лагранжа), на котором основана физическая интерпретация МКЭ, гласит, что в равновесном состоянии при произвольно малых перемещениях полная работа внутренних сил равна полной возможной работе внешних сил:

$$\int_v \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int_v \delta u^T p dV = \int_S \delta u^T q dS = \int_L \delta u^T f_L dL, \quad (10)$$

где $\delta \varepsilon$ — вариации тензора относительных деформаций; σ — тензор внутренних напряжений; δu — вариации вектора возможных перемещений; p, q, f_L — объемные, поверхностные и сосредоточенные внешние нагрузки, действующие на систему (тело).

Минимизация уравнения (10) приводит его к виду основного уравнения метода конечных элементов, записанного в матричной форме

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (11)$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости системы; $\{u\}$ — глобальный вектор смещений; $\{F\}$ — глобальный вектор сил.

Стандартное выражение для вычисления матрицы жесткости любых конечных элементов имеет вид:

$$[K] = \int_v [B]^T [D][B] dV, \quad (12)$$

Где $[B]$ — матрица производных функций формы; $[D]$ — матрица упругости; $[B]^T$ — транспонированная матрица производных функций формы; V — объем, по которому производится интегрирование.

Матрица упругости (свойств материала) для плоской задачи теории линейной упругости записывается в виде:

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu_1)} \begin{bmatrix} 1 & \nu_1 & 0 \\ \nu_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_1)/2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где E — модуль деформации (упругости); ν — коэффициент Пуассона; $\nu_1 = \nu$ — для плоского напряженного состояния; $\nu_1 = \nu(1 - \nu)$ — для плоской деформации.

Матрицы упругости для плоской задач теории упругости предполагает использование в физических уравнениях следующие вектора относительных деформаций и напряжений:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xy}\}^T, \quad (14)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{xy}\}^T. \quad (15)$$

Главные напряжения и относительные деформации вычисляются по формулам теории напряжений и деформаций механики сплошной среды.

Средние напряжения и средние относительные деформации вычисляются по формулам:

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \quad (16)$$

$$\varepsilon_m = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3, \quad (17)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — компоненты главных напряжений и относительных деформаций.

Моделирование выполнено методом конечных элементов для образца шириной 11 см толщиной 7 см. Результаты расчетов и оценка изменения перемещений (рис. 9), напряжений (рис. 10) и деформаций (рис. 11) образцов с внутренней трещиной и без трещины при нагрузке до 10 кН/м^2 .

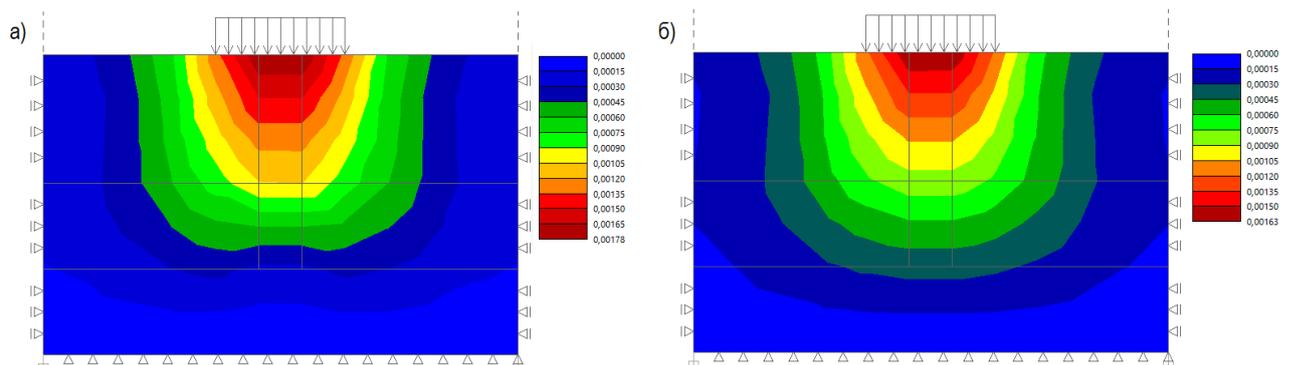


Рисунок 9. Результирующие перемещения d (мм) в образцах с внутренней трещиной (а) и без трещины (б) (разработано автором)

Figure 9. Resultant displacement d (mm) in samples with an internal crack (a) and without a crack (b) (developed by the author)

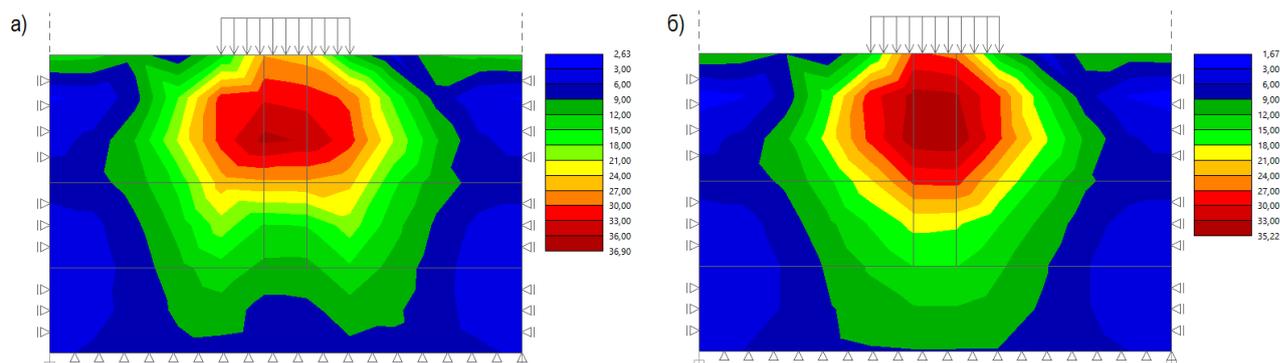


Рисунок 10. Эквивалентное девиаторное напряжение J (кПа) в образцах с внутренней трещиной (а) и без трещины (б) (разработано автором)

Figure 10. Equivalent deviator stress J (kPa) in samples with an internal crack (a) and without a crack (b) (developed by the author)

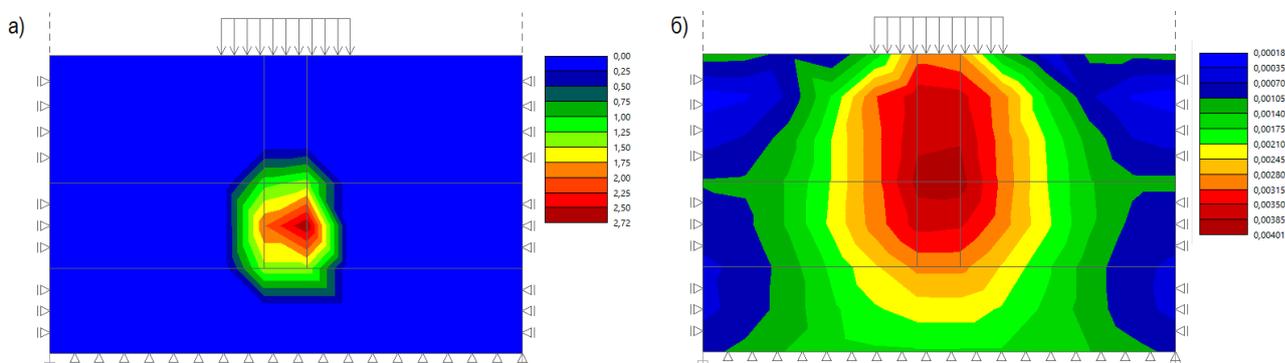


Рисунок 11. Эквивалентная девиаторная деформация E_d в образцах с внутренней трещиной (а) и без трещины (б) (разработано автором)

Figure 11. Equivalent deviator strain E_d in samples (a) internal crack and (b) without internal crack (developed by the author)

Таким образом, результаты математического моделирования изменения напряженно-деформированного состояния образцов с внутренними трещинами в покрытии дорожных одежд и в образцах без выжаренных дефектов покрытия показывают, что действительно зона с трещиной является зоной ослабления конструкции с ярко выраженным очагом концентрации напряжений.

Рекомендации по борьбе с внутренними и отраженными трещинами

Recommendations for combating internal and reflected cracks

Для предотвращения образования отраженных трещин, как следствия развития деформаций в слоях дорожных одежд под динамическим фактором транспортного нагружения необходимо учитывать механизм образования трещины [12; 28]:

- Трещины, образовавшиеся как следствие дефектов основания (колея, просадки).
- Трещины, образовавшиеся в слоях дорожной одежды в процессе ремонта конструкции.

При деформации основания земляного полотна и нижних слоев дорожной одежды необходимо выполнить полную разборку деформированных слоев и устройство новой конструкции дорожной одежды или переработку (методом холодной регенерации) деформированных слоев с перекрытием новым слоем покрытия [23; 29; 30].

В том случае, когда внутренние трещины образовались в результате выполнения ремонтных работ, необходимо уменьшить влияние концентрации напряжений на границах трещины на развитие деформаций в вышележащих слоях конструкции. Для уменьшения этого влияния необходимо:

- Исключить наличие в основании трещин, заполненных неукрепленным материалом (песок, грязь, продукт износа шин).
- Раскрыть трещины до ширины 15–20 мм и заполнить мастикой на всю глубину трещины.
- Закрыть трещину геосинтетическим полотном или георешеткой уложенной на основание подгрунтованное битумной эмульсией с перекрытием трещины не менее 25 см в обе стороны от оси трещины.

Таблица 6 / Table 6

Результаты испытания образцов-балочек с имитацией трещины и геосеткой
Test beam testing results with simulated crack and geogrid

№	Размеры образца-балочки, см Test beam dimensions, cm			Расстояние между опорами L, см Distance between supports L, cm	Максимальное значение прогиба, мм Maximum bending value, mm	Разрушающая нагрузка, Н Load at failure, N	Прочность при изгибе на растяжение, МПа Bending resistance on the strain, MPa	
	ширина b width b	высота h height h	длина l length l				отдельного образца individual sample	среднее значение average
Испытания при температуре плюс 22±3°C Tests at a temperature of plus 22±3°C								
1	7,00	7,10	30,50	20	2,17	2011	1,71	1,73
2	7,00	7,10	30,50	20	2,22	2057	1,75	
3	7,00	7,10	30,50	20	2,20	2039	1,73	
Испытания при температуре минус 18±2°C Tests at a temperature of minus 18±2°C								
1	7,10	7,05	30,50	20	0,90	10084	8,57	8,71
2	7,10	7,05	30,50	20	1,01	11317	9,62	
3	7,00	7,05	30,50	20	0,82	9188	7,92	

Разработано автором / Developed by the author

По методике представленной выше испытаны образцы-балочки с имитацией внутренней трещины и прослойкой из геосинтетического материала Геосетка E'GRID 3030 L. Результаты испытаний представлены в таблице 6. Результаты математического моделирования и оценки изменения напряженно-деформированного состояния предлагаемого способа предотвращения развития отраженных трещин показаны на рисунке 12.

Однозначно можно сказать, что деформации в конструкции с заделанной трещиной значительно меньше, чем в конструкциях с внутренней трещиной и сопоставимы с деформациями, развивающимися в дорожных одеждах с без внутренних трещин или в новых покрытиях.

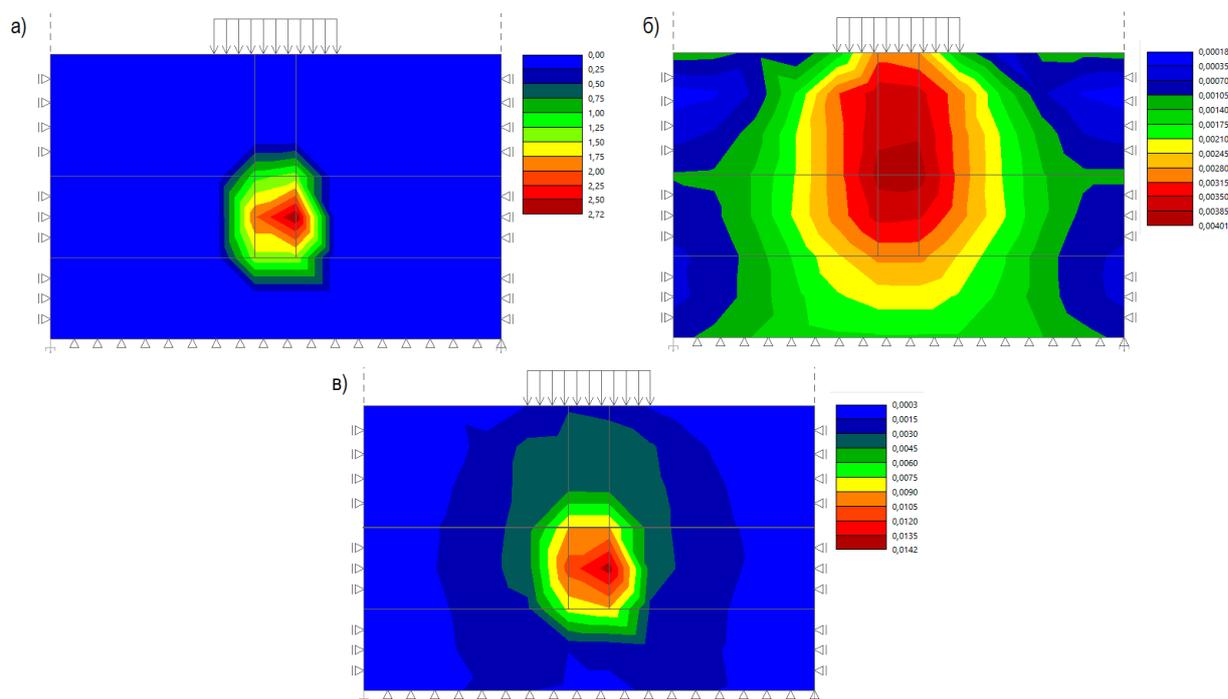


Рисунок 12. Эквивалентная дивiatorная деформация E_d в образцах с внутренней трещиной (а), без трещины (б) и с заделанной трещиной (в) (разработано автором)

Figure 12. Equivalent deviator strain E_d in samples with an internal crack (а), without a crack (б), and with a closed crack (в) (developed by the author)

Заключение

Conclusion

В результате выполненных исследований можно однозначно сказать, что наличие внутренние дефекты в многослойных дорожных покрытиях приводят к уменьшению предела прочности на растяжение конструкции. При положительных температурах (в весенне-летний период) прочность покрытия с внутренними дефектами значительно меньше прочности недеформированного покрытия, что в первую очередь

связано с развитием пластических деформаций и деформаций, связанных с течением битума.

Для повышения трещиностойкости конструкции и повышению прочности многослойной системы на растяжение при изгибе, рекомендуется при ремонте покрытия укладывать прослойку из георешетки в следующей последовательности производства работ:

- Исключить наличие в основании трещин, заполненных неукрепленным материалом (песок, грязь, продукт износа шин).
- Раскрыть трещины до ширины 15–20 мм и заполнить мастикой на всю глубину трещины.
- Закрыть трещину геосинтетическим полотном или георешеткой уложенной на основание подгрунтованное битумной эмульсией с перекрытием трещины не менее 25 см в обе стороны от оси трещины.
- Восстановить покрытие из асфальтобетона на проектную толщину.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каменчуков, А.В.** Оценка качества отдельных работ по ремонту покрытия автомобильных дорог / А.В. Каменчуков // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. — 2015. — № 1. — С. 29–33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25037806> (дата обращения: 10.12.2021).
2. **Onyango, M.** Analysis of cost effective pavement treatment and budget optimization for arterial roads in the city of Chattanooga / M. Onyango, S.A. Merabti, J. Owino, I. Fomunung, W. Wu. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0419-5> // Frontiers of Structural and Civil Engineering. — 2018. — Т 12. — № 3. — С. 291–299. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-017-0419-5> (дата обращения: 10.12.2021).
3. **Khan, T.U.** Use of Multiple Non-Destructive Evaluation Approaches in Connecticut to Establish Accurate Joint Repair and Replacement Estimates for Composite Pavement Rehabilitation / T.U. Khan, S.T. Norton, K. Keegan, J.S. Gould, C.D. Jacques. — DOI <https://doi.org/10.1061/9780784480922.018> // International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017 / Филадельфия, Пенсильвания: American Society of Civil Engineers, 2017. — С. 201–208. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480922.018> (дата обращения: 10.12.2021).
4. **Радовский, Б.С.** Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США / Б.С. Радовский // Internet Laboratories, Inc., США: Серия: Дорожная Техника. — 2006. — С. 108–119. — URL: <http://stroit.ru/stati/problema-povysheniya-dolgovechnosti-dorozhnyh-odezhd-i-metody-ee-resheniya-v-ssha/> (дата обращения: 10.12.2021).
5. **Egorova, G.I.** Innovations in the technology for producing asphalt concrete based on neutralized catalyst as a condition for improving the quality of road surfaces / G.I. Egorova, S.P. Semukhin, A.N. Egorov, N.A. Kachalov. — DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899x/941/1/012021> // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 941, The International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies" 26–27 June 2020, Barnaul, Russian Federation / Барнаул: IOP Publishing Ltd, 2020. — С. 12021. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/941/1/012021> (дата обращения: 10.12.2021).

6. **Wise B.** Rising From The Rubble: Los Angeles Repairs Its Roads / B. Wise // *Americanity & County*. — 1994. — Т 109, № 13. — С. 36–46.
7. **Walls, J.** Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design — Interim Technical Bulletin / J. Walls, M. R. Smith. — Federal Highway Administration, 1998. — 107 с. — URL: https://roadresource.org/assets/FHWA-SA-98-097_LCCA-21e443e88e477e018a1475a44d53764cf42dda5ef42af458f7c65863c52093ef.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
8. **Jiang, Y.** Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement / Y. Jiang, C. Deng, Z. Chen, Y. Tian. — DOI <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1483506> // *International Journal of Pavement Engineering*. — 2020. — Т 21. — № 4. — С. 447–456. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2018.1483506> (дата обращения: 10.12.2021).
9. **Дугельный, В.Н.** К вопросу анализа основных факторов, влияющих на износостойкость асфальтобетона и объемы продуктов его износа / В.Н. Дугельный, А.Ю. Логунов, Е.Г. Воловченко // *Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта*. — 2013. — № 4. — С. 99–104. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21715819> (дата обращения: 10.12.2021).
10. **Александров, А.С.** Анализ причин колесобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления / А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л. Калинин. — DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745> // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". — 2019. — Т 16. — № 6. — С. 718–745. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/986> (дата обращения: 10.12.2021).
11. **Корочкин, А.В.** О динамическом воздействии транспортного средства на конструкцию дорожной одежды / А.В. Корочкин // *Дороги и мосты*. — 2015. — № 1. — С. 98–104. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24862017> (дата обращения: 10.12.2021).
12. **Лакей, В.Н.** Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости / В.Н. Лакей, Ю.В. Ленченкова // *Матрица научного познания*. — 2019. — № 4. — С. 68–73. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37335428> (дата обращения: 10.12.2021).
13. **Апестин, В.К.** О расхождении проектных и нормативных межремонтных сроков службы дорожных одежд / В.К. Апестин // *Наука и техника в дорожной отрасли*. — 2011. — № 1. — С. 18–20. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15613067> (дата обращения: 10.12.2021).
14. **Лопашук, С.В.** Актуальные вопросы повышения качества выполнения ремонтных работ на автомобильных дорогах местного значения Дальневосточного федерального округа / С.В. Лопашук, А.В. Лопашук, В.В. Лопашук // *Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: Международный сборник научных трудов / Под редакцией А.В. Каменчукова Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2019. — С. 188–191. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41805747> (дата обращения: 10.12.2021).*
15. **Solatiyan, E.** Laboratory evaluation of interfacial mechanical properties in geogrid-reinforced bituminous layers / E. Solatiyan, N. Bueche, A. Carter. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2020.12.014> // *Geotextiles and Geomembranes*. — 2021. — Т 49. — № 4. — С. 895–909. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114420301709> (дата обращения: 10.12.2021).
16. **Zornberg, J.G.** Geosynthetics in pavements: North American contributions Geosynthetics in pavements: North American contributions / J.G. Zornberg, R. Gupta // *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics / Гуаружа: Brazilian Association of Geosynthetics, 2010. — С. 379–400. — URL: https://www.cae.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/CP/Zornberg_Gupta_2010.pdf (дата обращения: 10.12.2021).*
17. **Choi, Y.-T.** Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement / Y.-T. Choi, Y.R. Kim. — DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927085> // *Road Materials and Pavement Design*. — 2014. — Т. 15. — № 1. — С. 195–218. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2014.927085> (дата обращения: 10.12.2021).
18. **Erlingsson S.** Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator / S. Erlingsson, Th. Ingason // *2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing / Миннеаполис: University of Minnesota, 2004. — С. 19.*

19. **Harvey, J.T.** Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004 / J.T. Harvey, C.L. Monismith, W.A. Nokes, N.F. Coetzee. — Дэвис: University of California, 2006. — 71 с. — URL: http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/SummRpt%202000-04_UCPRC-SR-2006-02_final.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
20. **Khazanovich, L.** The second generation of Minnesota accelerated loading facility — Minne-ALF-2 / L. Khazanovich, I. Yut, D. Tompkins, A. Schultz // Proceedings — 8th International Conference on Concrete Pavements: Innovations for Concrete Pavement: Technology Transfer for the Next Generation, Vol. 3 / Колорадо-Спрингс: International Society for Concrete Pavements, 2005. — С. 1013–1029.
21. **Monismith, C.** Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program / C. Monismith, J. Harvey, T. Hoover, N. Coetzee. — DOI // Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004 / Миннеаполис: University of Minnesota, 2004.
22. **Stokoe, K.H.** Super-Accelerated Testing of Flexible Pavement with Stationary Dynamic Deflectometer / K.H. Stokoe, J.A. Bay, B.L. Rosenblad, M.R. Murphy, K.W. Fults, D.-H. Chen. — DOI <https://doi.org/10.3141%2F1716-12> // Transportation Research Record. — 2000. — Т. 1716. — № 1. — С. 98–107. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1716-12> (дата обращения: 10.12.2021).
23. **Каменчуков, А.В.** Исследование и моделирование процесса образования отраженных трещин в двухслойных асфальтобетонных системах / А.В. Каменчуков, И.С. Украинский. — DOI <https://doi.org/10.15862/07SATS320> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 3. — С. 07SATS320. — URL: <https://t-s.today/07SATS320.html> (дата обращения: 10.12.2021).
24. **Медведев, Д.В.** Методологические подходы к определению эксплуатационных характеристик геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожных одежд / Д.В. Медведев, С.А. Богомолова, Е.Н. Симчук // Дороги и мосты. — 2021. — № 2. — С. 283–300. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340786> (дата обращения: 10.12.2021).
25. **Михайлин, Р.Г.** Методика численного моделирования усиления основания дорожных одежд автомобильных дорог георешетками / Р.Г. Михайлин // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 2. — С. 72–76. — URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41360> (дата обращения: 10.12.2021).
26. **Вайнштейн, Е.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния дорожной одежды лесовозной автодороги по касательным напряжениям методом конечных элементов / Е.В. Вайнштейн, В.М. Вайнштейн, П.А. Нехорошков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. — 2012. — № 1. — С. 64–73. — URL: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/163> (дата обращения: 10.12.2021).
27. **Гусев, Н.К.** Исследование прочности слоёв конструкции дорожной одежды из материалов, укрепленных полимерно-минеральной композицией "NicoFloK" / Н.К. Гусев, П.А. Нехорошков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. — 2013. — № 2. — С. 52–58. — URL: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/105> (дата обращения: 10.12.2021).
28. **Вольская, Н.С.** Моделирование взаимодействия автомобильного колеса с неровной опорной поверхностью / Н.С. Вольская, Я.Ю. Левенков, О.А. Русанов // Машиностроение и инженерное образование. — 2011. — № 4. — С. 40–46. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21120413> (дата обращения: 10.12.2021).
29. **Ларина, Т.А.** Метод оценки кинетики износа асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Т.А. Ларина, Н.Р. Зубарев // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. — 2019. — № 1. — С. 5. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37260277> (дата обращения: 10.12.2021).
30. **Углова, Е.В.** Разработка эффективных решений ремонта дорожной одежды на городских магистралях / Е.В. Углова, Д.С. Васильев // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 2–2. — С. 80. — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072> (дата обращения: 10.12.2021).
31. **Бондарев, Б.А.** Пути повышения долговечности дорожных одежд городских автомобильных дорог / Б.А. Бондарев, П.В. Сошнин, А.Б. Бондарев // Новые материалы и технологии в машиностроении. — 2005. — № 4. — С. 28–29. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877921> (дата обращения: 10.12.2021).

Сведения об авторах:

Каменчуков Алексей Викторович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006641@pnu.edu.ru

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Украинский Илья Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 006012@pnu.edu.ru

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=548294

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57222612375>

Селенок Марина Дмитриевна — студент, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: 2018103807@pnu.edu.ru

Статья получена: 25.12.2021. Принята к публикации: 09.03.2022. Опубликовано онлайн: 23.03.2022.

Грант Президента РФ договор № 075-15-2020-286 (внутренний номер МК-511.2020.8)

REFERENCES

1. Kamenchukov A.V. Quality assessment of selected works on repair of roads pavement. *Far East: problems of development of the architectural and construction complex*. 2015; (1): 29–33. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25037806> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Onyango M., Merabti S.A., Owino J., Fomunung I., Wu W. Analysis of cost effective pavement treatment and budget optimization for arterial roads in the city of Chattanooga. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2018; 12(3): 291–299. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0419-5>.
3. Khan T.U., Norton S.T., Keegan K., Gould J.S., Jacques C.D. Use of Multiple Non-Destructive Evaluation Approaches in Connecticut to Establish Accurate Joint Repair and Replacement Estimates for Composite Pavement Rehabilitation. In: *International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology 2017*. Philadelphia, Pennsylvania: American Society of Civil Engineers; 2017. p. 201–208. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480922.018> (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784480922.018>.
4. Radovskiy B.S. [The problem of increasing the durability of pavements and methods for solving it in the USA]. *Internet Laboratories, Inc., USA: Series: Road Equipment*. 2006; 108–119. Available at: <http://stroit.ru/stati/problema-povysheniya-dolgovechnosti-dorozhnyh-odezhd-i-metody-ee-resheniya-v-ssha/> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
5. Egorova G.I., Semukhin S.P., Egorov A.N., Kachalov, N.A. Innovations in the technology for producing asphalt concrete based on neutralized catalyst as a condition for improving the quality of road surfaces. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 941, The International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Ecology, Transport and Agricultural Technologies" 26–27 June 2020, Barnaul, Russian Federation*. Barnaul: IOP Publishing Ltd; 2020. p. 12021. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/941/1/012021> (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/941/1/012021>.
6. Wise B. Rising From The Rubble: Los Angeles Repairs Its Roads. *American City & County*. 1994; 109(13): 36–43. (In Eng.).
7. Walls J., Smith M.R. Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design — Interim Technical Bulletin. Federal Highway Administration; 1998. Available at: https://roadsource.org/assets/FHWA-SA-98-097_LCCA-21e443e88e477e018a1475a44d53764cf42dda5ef42af458f7c65863c52093ef.pdf (accessed 10th December 2021). (In Eng.).
8. Jiang Y., Deng C., Chen Z., Tian Y. Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement. *International Journal of Pavement Engineering*. 2020; 21(4): 447–456. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1483506>.

9. Dugelnyj V.M., Logunov A.Y., Volovnenko O.G. The issues of crucial factors investigation, regarding asphaltic concrete wearability and its wear debris products volume. *Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport*. 2013; (4): 99–104. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46416645> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L. Rutting on the Surfaces of Non-Rigid Road Pavements: Analysis of The Causes and Recommendations for Reducing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16(6): 718–745. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>.
11. Korochkin A.V. On the dynamic impact of a vehicle on the pavement structure. *Roads and bridges*. 2015; (1): 98–104. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24862017> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
12. Lakey V.N., Lenchenkova Yu.V. [Analysis of the causes of cracks in road surfaces and criteria for their crack resistance]. *Matrix of scientific knowledge*. 2019;(4): 68–73. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37335428> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
13. Apestin V.K. About Divergence Between Design and Normative Interrepair Periods of Road Pavement Service. *Advanced Science and Technology for Highways*. 2011; (1): 18–20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15613067> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
14. Lopashchuk S.V., Lopashchuk A.V., Lopashchuk V.V. [Topical issues of improving the quality of repair work on local roads of the Far Eastern Federal District]. In: Kamenchukov A.V. (eds). [*Far East. Highways and traffic safety: International collection of scientific papers*]. Khabarovsk: Pacific State University; 2019. p. 188–191. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41805747> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
15. Solatiyan E., Bueche N., Carter A. Laboratory evaluation of interfacial mechanical properties in geogrid-reinforced bituminous layers. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021; 49(4): 895–909. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.014>.
16. Zornberg J.G., Gupta R. Geosynthetics in pavements: North American contributions Geosynthetics in pavements: North American contributions. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics*. Guarujá: Brazilian Association of Geosynthetics; 2010. p. 379–400. Available at: https://www.cae.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/CP/Zornberg_Gupta_2010.pdf (accessed 10th December 2021). (In Eng.).
17. Choi Y.-T., Kim Y.R. Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2014; 15(1): 195–218. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927085>.
18. Erlingsson S., Ingason Th. Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator. In: *2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing*. Minneapolis: University of Minnesota; 2004. p. 19.
19. Harvey J.T., Monismith C.L., Nokes W.A., Coetzee N.F. Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004. Davis: University of California; 2006. Available at: http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/SummRpt%202000-04_UCPRC-SR-2006-02_final.pdf (accessed 10th December 2021). (In Eng.).
20. Khazanovich L., Yut I., Tompkins D., Schultz A. The second generation of Minnesota accelerated loading facility — Minne-ALF-2. In: *Proceedings — 8th International Conference on Concrete Pavements: Innovations for Concrete Pavement: Technology Transfer for the Next Generation, Vol. 3*. Colorado Springs: International Society for Concrete Pavements; 2005. p. 1013–1029.
21. Monismith C., Harvey J., Hoover T., Coetzee N. Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004*. Minneapolis: University of Minnesota; 2004.
22. Stokoe K.H., Bay J.A., Rosenblad B.L., Murphy M.R., Fults K.W., Chen D.-H. Super-Accelerated Testing of Flexible Pavement with Stationary Dynamic Deflectometer. *Transportation Research Record*. 2000; 1716(1): 98–107. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3141%2F1716-12>.

23. Kamenchukov A.V., Ukrainskiy I.S. Reflected cracks buildups surveying and process simulation in double-layer asphalt-concrete systems. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(3): 07SATS320. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/07SATS320>.
24. Medvedev D.V., Bogomolova S.A., Simchuk E.N. [Methodological approaches to determining the performance characteristics of geosynthetic materials for reinforcing asphalt concrete layers of pavement]. *Roads and bridges*. 2021; (2): 283–300. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47340786> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).
25. Mikhaylin R.G. Numerical Modelling Technique of Geogrid Reinforcement of The Base of Road Clothes for Highways. *Fundamental research*. 2017; (2): 72–76. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41360> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
26. Vainshtein E.V., Vainshtein V.M., Nekhoroshkov P.A. Research Of Strain-Stress State of Road Structure of Forest Motor Road by Tangential Stress with The Use of Finite-Element Method. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*. 2012; (1): 64–73. Available at: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/163> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
27. Gusev N.K., Nekhoroshkov P.A. Study of Solidity of Road Structure Constructed with The Use of Polymer-Mineral Composition «Nicoфлок». *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*. 2013; (2): 52–58. Available at: <http://vestnik.volgatech.net/index.php/forest/article/view/105> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
28. Volskaya N.S., Levenkov J.Y., Rusanov O.A. Modelling of Automobile Wheel Interaction with Uneven Ground Contact Area. *Mechanical engineering and engineering education*. 2011; (4): 40–46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21120413> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
29. Larina T.A., Zubarev N.R. Method For Estimating the Kinetics of Wear of Asphalt-Concrete Coatings of Automobile Roads. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2019; (1): 5. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37260277> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
30. Uglova E.V., Vasiliev D.S. Developing Effective Solutions Repair Pavement on City Highways. *Engineering Journal of Don*. 2015; (2–2): 80. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3072> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
31. Bondarev B.A., Soshnin P.V., Bondarev A.B. [Ways to improve the durability of road pavement of urban roads]. *New materials and technologies in mechanical engineering*. 2005; (4): 28–29. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877921> (accessed 10th December 2021). (In Russ.).

Information about the authors:

Aleksey V. Kamenchukov — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006641@pnu.edu.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=767839
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207104736>

Ilya S. Ukrainskiy — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 006012@pnu.edu.ru
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=548294
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57222612375>

Marina D. Selenok — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: 2018103807@pnu.edu.ru

Submitted: 25th December 2022. Revised: 09th March 2022. Published online: 23rd March 2022.

Grant of the President of the Russian Federation contract No. 075-15-2020-286 (internal number MK-511.2020.8)